

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ»



СТРИЙ ОЛЕКСАНДР АНАТОЛІЙОВИЧ

УДК 621.43.056:632.15

**ВПЛИВ ПАРАМЕТРІВ СТРУМЕНЕВО-НІШЕВОЇ СИСТЕМИ НА РОБОЧИЙ
ПРОЦЕС ПАЛЬНИКОВИХ ПРИСТРОЇВ**

05.14.14 – Теплові та ядерні енергоустановки

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Київ 2016

Дисертацією є рукопис.

Роботу виконано на кафедрі теплоенергетичних установок теплових і атомних електростанцій Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут» Міністерства освіти і науки України

Науковий керівник: кандидат технічних наук, доцент
Абдулін Михайло Загретдинович,
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут»,
доцент кафедри теплоенергетичних установок
теплових і атомних електростанцій

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, старший науковий співробітник
Білека Борис Дмитрович,
Інститут технічної теплофізики НАН України,
провідний науковий співробітник відділу теплотерії,
діагностики і оптимізації в енергетиці

кандидат технічних наук, старший науковий співробітник
Топал Олександр Іванович,
Інститут вугільних енерготехнологій НАН України,
завідувач відділу процесів горіння та газифікації вугілля

Захист відбудеться “25” жовтня 2016 року о 15-00 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.002.09 у Національному технічному університеті України «Київський політехнічний інститут» за адресою: 03056, Київ, просп. Перемоги, 37, корпус 5, аудиторія 307.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут» за адресою: 03056, Київ, просп. Перемоги, 37.

Автореферат розісланий „___” вересня 2016 р.

Учений секретар
спеціалізованої вченої ради



В. І. Коньшин

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Основним джерелом енергії для потреб людства (опалення, електроенергія, транспорт, промисловість тощо) є органічне паливо, досвід використання якого, починаючи від деревини, вугілля, смоли, сирової нафти, нараховує сотні тисяч років. Простота використання у промисловості як основного палива природного газу, його екологічність, високий рівень розвитку інфраструктури, а також вигідне географічне положення України з погляду транспортування та споживання палива, визначили широке розповсюдження природного газу в промисловості та енергетиці країни. Порівняно з альтернативними паливними газами (генераторним, доменним, шахтним, біогазом) природний газ має найпривабливіші характеристики і в найближчий час його швидка заміна на альтернативні палива в хімічній, важкій промисловості та енергетиці неможлива. Отже актуальним на найближчий період є впровадження сучасних енергоефективних технологій, які б задовольняли вимогам по рівню емісії шкідливих викидів, а також дозволяли б у найкоротші терміни окупити витрати на модернізацію застарілого обладнання за рахунок підвищення його економічності.

Виходячи з особливості умов експлуатації вітчизняного вогнетехнічного обладнання (ВО), однією з найголовніших проблем залишається також збереження ефективності роботи ВО на змінних режимах експлуатації.

Вирішення поставленого завдання можливе у разі реалізації підходу, який би дозволив за допомогою ефективної технології спалювання розв'язати ряд актуальних задач, в тому числі при проведенні модернізації існуючого ВО:

- енергетичних та водогрійних котлів;
- ВО хімічного, будівельного та сільського господарства.

Однією з ефективних паливоспалюючих вітчизняних технологій, яка дозволяє надійно та ефективно працювати в широкому діапазоні навантажень ВО, є струменево-нішева технологія (СНТ), розроблена на основі досліджень, проведених у НТУУ «КПІ». Актуальність роботи зумовлена необхідністю знизити пускові витрати палива в пальниках для забезпечення рівномірного прогрівання футеровки і мінімізації термічного «удару», забезпечення сталості горіння без «зриву» та пульсацій факелу в усьому діапазоні роботи ВО. Удосконалення пускових характеристик повинно бути досягнуто без втрати ефективності роботи на номінальних теплових режимах із збереженням екологічних норм експлуатації ВО.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Основні результати отримано під час виконання робіт, які полягають у проведенні фундаментальних та прикладних досліджень, виконуваних на кафедрі ТЕУ Т і АЕС НТУУ «КПІ» за темами: д/б НДР № 2539-п (державний реєстраційний номер 0112U001751) «Підвищення ефективності та надійності функціонування устаткування ТЕС та малої енергетики в змінних режимах експлуатації»; д/б НДР № 2637-п (державний реєстраційний номер 0113U001773) «Розробка технології використання скидних енергоресурсів та альтернативних паливних газів на основі їх високоефективного спалювання» протягом 2013–2015 рр.

Мета і задачі дослідження. Мета дисертаційної роботи полягає у визначенні способів підвищення рівня ефективності роботи ВО в умовах змінних режимів його експлуатації за рахунок розширення меж сталої роботи пальників СНТ та коефіцієнта робочого регулювання модернізованих об'єктів, зниження витрати палива на пускових режимах, адаптації системи паливорозподілу пальникових пристроїв (ПП) до спалювання газів з різною стехіометрією, а також визначення технологічних можливостей щодо зниження емісії шкідливих речовин у навколишнє середовище. Досягнення поставленої мети має бути досягнуто з максимально можливим збереженням конструкції ВО.

Для досягнення поставленої мети було сформульовано такі задачі:

1. Візуалізація структури течії потоку в струменево-нішевій системі (СНС) в умовах ізотермічних продувок, а також під час спалювання палива при зміні геометричних параметрів нішевого стабілізатора.

2. Дослідження закономірностей процесів гідродинаміки та сумішоутворення у СНС залежно від її геометричних характеристик експериментальним способом та за допомогою методів розрахункової газової динаміки.

3. Визначення закономірностей процесів масообміну активного потоку із зоною рециркуляції в нішевій порожнині, а також встановлення меж та умов сталої роботи системи без зриву полум'я.

4. Дослідження впливу конфігурації струменево-нішевого стабілізатора полум'я на діапазон сталої горіння факела.

5. Визначення конструктивних та режимних параметрів паливорозподілу СНС, які визначають зміщення в бік дифузійності або кінетичності процесу горіння палива в СНС.

6. Розроблення заходів з мінімізації емісії токсичних оксидів азоту (NO_x) та вуглецю (CO) за рахунок впровадження технологічних прийомів зниження шкідливих викидів у навколишнє середовище.

7. Розроблення науково-обґрунтованих рекомендацій з приводу впровадження універсального ПП на основі СНТ з удосконаленою конструкцією струменево-нішевого стабілізатора полум'я, який має забезпечити покращені пускові та робочі характеристики газових водогрійних котлів з можливістю ефективного використання природного газу як основного палива та зрідженого газу як резервного.

Об'єкт дослідження - процес дифузійно-кінетичного спалювання газоподібного палива в пальникових пристроях струменево-нішевого типу.

Предмет дослідження - закономірності процесів гідродинаміки, сумішоутворення і горіння в струменево-нішевій системі стабілізації полум'я при зміні її геометричних та режимних параметрів.

Методи дослідження. Поставлені завдання вирішувались за допомогою експериментальних та числових методів з наступною перевіркою запропонованих технічних рішень у промислових умовах. Кінцеве впровадження супроводжувалося випробуваннями модернізованого ВО в умовах промислової експлуатації. Достовірність числових даних порівнювалась з результатами лабораторних експериментів. Обробка та узагальнення отриманих експериментальних, чисельних та промислових результатів проводилася за допомогою ЕОМ.

Наукова новизна одержаних результатів. У результаті виконаних у роботі досліджень вперше отримано такі наукові результати:

1. Вперше визначено особливості масообмінних процесів в струменево-нішевому стабілізаторі полум'я на пускових режимах роботи ПП СНТ залежно від геометричних параметрів нішевої порожнини.

2. Вперше отримано експериментальні дані та одержано узагальнюючі залежності стосовно меж сталої роботи СНС при спалюванні газоподібних палив, різних за своїми стехіометричними характеристиками. Результати отримано на основі аналізу теплової моделі стабілізації полум'я.

3. Визначено можливості щодо впровадження технологічних засобів придушення емісії оксиду азоту – рециркуляція продуктів згоряння на пальники, а також зволоження дуттьового повітря – при спалюванні природного газу в умовах промислової експлуатації паливовикористовуючого обладнання об'єктів тепломереж, модернізованих на основі СНТ.

4. Розроблено науково-методичні засади проектування ПП СНТ, які дозволяють виготовляти пальники для різних технічних умов роботи ВО. Запропонована методика дозволяє систематизувати значний технічний досвід проектування промислового газопальникового обладнання.

Практичне значення одержаних результатів.

1. Покращено пускові характеристики пальників СНТ за рахунок відповідної зміни геометричних параметрів паливорозподілу та нішевої порожнини в СНС.

2. На основі практичних результатів випробувань СНС при спалюванні газоподібного палива з різним стехіометричним складом (зріджений та природний газ) сформульовано рекомендації щодо адаптації пальників СНТ до спалювання газів з різною теплотворною здатністю.

3. Отримані результати щодо вдосконалення параметрів СНС дозволили провести маловитратну модернізацію котлів «Житомиртеплокомун-енерго» зі збереженням нормативних значень за емісійними та режимними показниками ВО (оксиди азоту та вуглецю). Результати економії за опалювальний період 2013–2014 рр. на котлі КВГМ-20 становлять у середньому 3 % від витрати палива.

4. У результаті промислових випробувань ВО отримано характеристики емісії оксидів азоту із застосуванням технологічних засобів їх зниження. Отримані результати можуть бути використані для водогрійних котлів теплопродуктивністю до 20 Гкал.

5. Узагальнені залежності, отримані в результаті оброблення експериментальних і розрахункових даних, використано в методиці розрахунку ПП НВО «СНТ».

6. Результати дисертації використовуються у навчальному процесі кафедри ТЕУ Т і АЕС НТУУ «КПІ» під час проведення лабораторних і практичних занять.

Особистий внесок здобувача. Основні наукові результати дисертаційної роботи здобувачем отримано самостійно. Особистий внесок полягає у постановці завдань дослідження [1], розроблення та реалізації методів фізичного моделювання основних стадій робочого процесу [2, 5–8, 10], аналізі та узагальненні основних експериментальних даних та в удосконаленні методики проектування пальникових пристроїв для вогнетехнічного обладнання (ВО) [16].

Автор брав безпосередню участь у проведенні лабораторних стендових випробувань, замірів усіх необхідних параметрів для визначення витрат компонентів, зривних характеристик, а також замірів компонент продуктів згоряння палива [3, 4]. Всі числові розрахунки автор виконав самостійно, основні результати зіставленні з експериментальними даними, отриманими власноруч, або з даними інших авторів. Аналіз результатів експериментальних та числових досліджень, а також їх узагальнення, промислові випробування ПП з урахуванням результатів дисертації проведено за безпосередньої участі автора роботи [9, 11–15].

Апробація результатів дисертації. Основні положення дисертації заслуговувалися та обговорювалися на X, XI, XII Міжнародних науково-практичних конференціях аспірантів, магістрантів, студентів «Сучасні проблеми наукового забезпечення енергетики», НТУУ «КПІ», ТЕФ (Київ, Україна, 2012, 2013, 2014), Науковій конференції «Інноваційний потенціал науки – XXI сторіччя. Запоріжжя: Південноукраїнський гуманітарний альянс» (Запоріжжя, березень 2013 р.), Науковій конференції «Россия – Украина – Сколково. Единое информационное пространство» (м. Київ, червень 2013 р.), XXIII Міжнародній конференції країн СНД «Проблеми екології та експлуатації об'єктів енергетики» (м. Ялта, червень 2013 р.), VIII Міжнародній науково-практичній конференції «Повышение эффективности энергетического оборудования» (м. Москва, грудень 2013 р.), XI Міжнародній науково-практичній конференції «Угольная теплоэнергетика: проблемы реабилитации и развития» (м. Київ, жовтень 2015 р.), а також на наукових семінарах кафедри ТЕУ Т і АЕС НТУУ «КПІ» «Підвищення ефективності використання органічних палив в енергетиці та промисловості», присвячених пам'яті видатного вченого в галузі створення технологій спалювання В. О. Христича НТУУ «КПІ» (м. Київ, листопад 2012–2015 р.).

Публікації. Результати досліджень опубліковано у 16 наукових працях, у тому числі 1 монографія, 6 статей у наукових фахових виданнях, з них 4 статті у виданнях, які включені до міжнародних наукометричних баз, та 1 публікація закордонна, 9 тез доповідей у збірниках матеріалів конференцій.

Структура дисертації. Робота складається зі вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаних джерел (131 найменування). Обсяг роботи становить 160 сторінок основного тексту, містить 85 рисунків і 9 таблиць. Загальний обсяг роботи–198 сторінок.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність роботи, сформульовано мету й основні завдання досліджень. Наведено загальну характеристику роботи, визначено наукову новизну і практичну цінність поданих результатів. Наведено відомості щодо особистого внеску здобувача, апробації результатів досліджень.

У першому розділі розглянуто основні поняття теорії горіння органічних палив. Наведено огляд найбільш поширених технологій спалювання палива. Подано класифікацію ПП за гідродинамічною схемою витікання пального та окисника. Вказано основні переваги та недоліки, особливості робочого процесу, характеристики та сфери застосування ПП.

Значну увагу приділено огляду розробок кафедри ТЕУ Т і АЕС та Лабораторії проблем горіння НТУУ «КПІ», в якій в різні часи працювали відомі вчені В. О. Христич, Г. М. Любчик, В. В. Крижановський, Л. С. Бутовський, М. З. Абдулін. Визначено основні досягнення в галузі проектування газопальникових пристроїв, основні з яких безпосередньо стосуються камер згоряння газових турбін.

З огляду на державні проблеми у сфері використання природного газу, зумовлені передусім істотною залежністю України від експорту палива, для досліджень та подальшого розвитку обрано «струменево-нішеву технологію» спалювання газоподібного палива СНТ, яка вигідно вирізняється серед найбільш нині поширених технологій, в основі робочого процесу яких покладено «закручення» потоку окисника. Основною перевагою технології вважають високу ефективність роботи в широкому діапазоні навантажень. Показано впровадження пальників струменево-нішевого типу в промисловості, енергетиці України. Обґрунтована доцільність і основні напрями досліджень пальників цього типу, які полягають у розширенні коефіцієнта регулювання об'єктів за рахунок сталості горіння на знижених (змінних) тисках палива, забезпеченні надійного пуску ВО за мінімальних тисків пального, а також можливості ефективного використання газів, різних за своїми властивостями, в умовах «універсальної» конструкції паливорозподілу. Важливим завданням є досягнення зазначених робочих характеристик із забезпеченням нормативних показників за рівнем шкідливих викидів у атмосферу.

У цьому розділі також сформульовано програму досліджень відповідно до проблематики, яка має забезпечити виконання поставлених у роботі цілей щодо ефективного енерго-екологічного використання палива вогнетехнічним обладнанням.

Другий розділ присвячено опису експериментальної установки, методиці виконання досліджень у лабораторних, а також у промислових умовах на працюючому обладнанні. Оцінено похибки експерименту під час вимірювання параметрів робочого процесу досліджуваних пальникових модулів. Представлений план рототабельного центрального композиційного планування експерименту з ціллю визначення раціонального паливорозподілу в умовах СНС для забезпечення надійності процесу пуску і розширення меж стабільного горіння факелу залежно від виду пального газу. Подано перелік основної вимірювальної апаратури, яка застосовувалась під час проведення експериментальних та промислових досліджень.

Конструктивне розміщення СНС на елементарному паливному колекторі-пілоні показано на рис. 1. Основні геометричні параметри паливорозподілу позначено d , L_1 , S , нішевого стабілізатора – L , H , пілона – B , C , а також режимні параметри системи W_r та W_n – швидкість палива та повітря відповідно. У роботі досліджено СНС, розміщену в прямокутному повітряному каналі висотою $H_k = 72$ мм з можливістю зменшення його розміру до 24 мм. Параметри паливорозподілу змінювали в межах: $d = 1,3 \dots 8$ мм; $L = 5 \dots 60$ мм; $\bar{S} = 1,5 \dots 6,5$. До розгляду взято такі геометричні розміри нішевої порожнини: $L = 20 \dots 80$ мм; $H = 5 \dots 20$ мм. Типорозміри ніш реалізовано в діапазоні $L/H = 4 \dots 5$. При визначенні стабілізаційних якостей змінювали кут нахилу бокових стінок β у межах $90 \dots 30^\circ$.

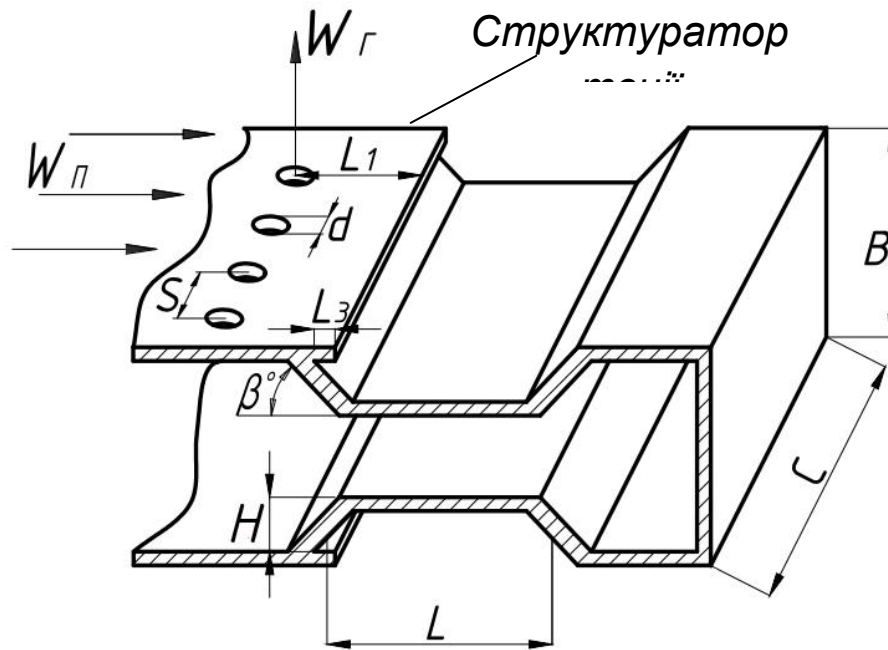


Рис. 1. Схема розміщення СНС на плоскому стабілізаторі

Додатково розглянуто вплив плоскої накладки-структуратора, розміщеної на передній за потоком стінці ніші на характер течії в зоні зворотних струмів (ЗЗС) нішевої порожнини.

В межах варіювання досліджуваних геометричних параметрів проведено аналіз продуктів згоряння природного та зрідженого газу в робочому діапазоні швидкостей палива та окисника: $W_Г = 0,5 \dots 160$ м/с; $W_П = 1 \dots 30$ м/с.

Для реалізації дослідження паливорозподілу виготовлено спеціальний газовий колектор з можливістю легкої заміни системи газоподачі.

Промислові експерименти являли собою еколого-теплотехнічні випробування ВО з пальниками типу СНТ-45 в складі водогрійного котельного агрегату КВГМ-20, пальників СНТ-33 на котлі КВ-Г-6,5, СНТ-25 – в складі контактних водонагрівачів КВН-2,9Гс, СНТ-11 на котлі НИИСТУ-5.

Промислові випробування виконували згідно з відповідною методикою та стандартом підприємства, при цьому використовували всю необхідну вимірювальну апаратуру: лічильники витрати води та газу, термометри, лічильники теплоти. Для визначення хімічного складу димових газів (CO , O_2 , NO_x) використовували газоаналізатор Testo 330ll, ОКСИ-5М. Відбір проб газу проводили в режимній та балансовій точках газового тракту котла.

Під час випробувань витрату газу контролювали за допомогою газових лічильників, установлених у котельні, які також обладнані лічильниками теплоти.

У третьому розділі подано результати лабораторних досліджень гідродинамічної структури потоку при зміні конфігурації нішевої порожнини, а також результати числових розрахунків параметрів робочого процесу СНС за допомогою методів обчислювальної газової динаміки.

Структуру течії під час обтікання прямокутної нішевої порожнини наведено на рис. 2. Течію в прямокутній ніші характеризують як відривну з наявністю фіксованої точки відриву на передній стінці, а також позитивного градієнта тиску.

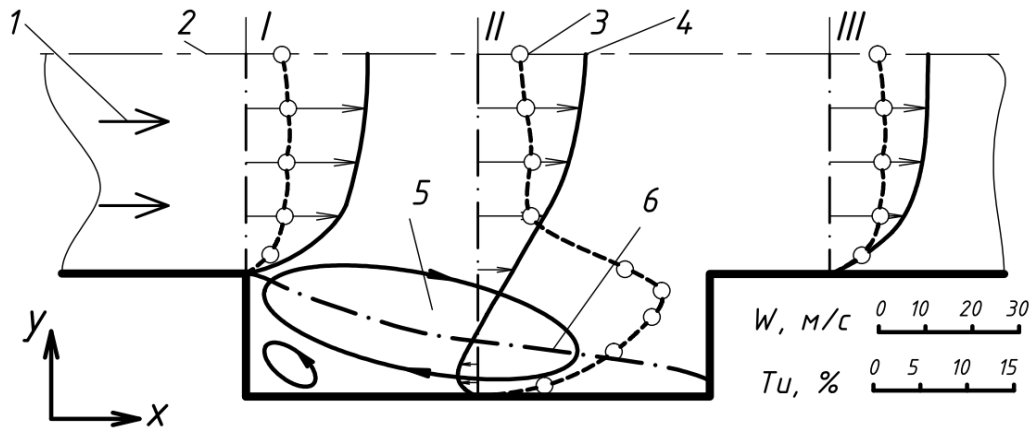


Рис. 2. Структура течії в нішевій порожнині прямокутної форми: 1 – потік повітря, який набігає; 2 – вісь каналу; 3 – розподіл інтенсивності турбулентності в перерізах; 4 – розподіл осередненої у часі осьової складової швидкості; 5 – циркуляційна течія; 6 – лінія нульових швидкостей; I – III – поперечні перетини повітряного каналу

Для аналізу впливу плоскої накладки-структуратора на розподіл середньої швидкості потоку наведено залежності $U = f(y)$ для каверни з установленим структуратором та без нього в ніші трапецієподібної форми (з кутом нахилу бокових стінок 45°). Швидкість потоку в перетині, що проходить через центр нішевої порожнини становить $U = 18$ м/с, що відповідає числу Рейнольдса $84 \cdot 10^3$ (рис. 3).

При відсутності структуратора у каверні розвивається класична відривна течія з максимальною швидкістю зворотного руху 5 м/с, що становить 36 % від швидкості основного потоку в центральному каналі пальника. Профіль середніх швидкостей потоку в центрі пальника є прямокутним, про що свідчить залежність $U = f(y)$ для висот y від 30 до 60 мм. У каверні з установленим структуратором утворюється складна в гідродинамічному сенсі картина течії – відбувається поділ суцільної вихрової зони (яка спостерігається в каверні без накладки) на систему окремих вихрів, які взаємодіють між собою, про що свідчить деформація профілю швидкості на висоті від 0 до 10 мм. Розподіл середньоквадратичних пульсацій швидкостей, що відповідають середній швидкості потоку в центрі каналу 18 м/с, наведено на рис. 3. в.

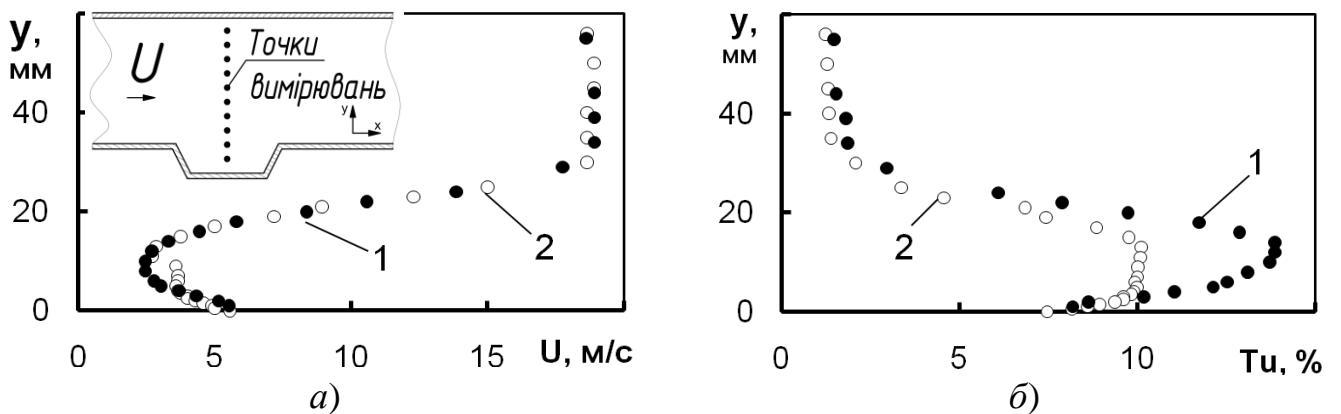


Рис. 3. Результати термоанемометричних досліджень структури потоку в перетині, що відповідає центру трапецієподібної ніші (перетин II, рис. 2) – 1; трапецієподібна ніша з структуратором – 2; для осередненої швидкості в каналі – а; інтенсивності турбулентності в досліджуваних перетинах – б

Установлення структуратора на 29 % знижує сумарну турбулентність потоку в каверні. У центрі каверни турбулентність потоку становить 14 %, тоді як у каверні з установленим структуратором вона досягає 10 %.

У пальниках СНС виконують з «відкритою» нішею, що відповідає умові $L/H = 3,5 \dots 5,0$, і супроводжується утворенням основної вихрової структури в об'ємі ніші за рахунок «відриву» частини потоку від основної маси на передній кромці з приєднанням її до задньої. Збільшення довжини ніші призводить до перебудови структури зворотної течії та погіршує стабілізаційні якості СНС.

У роботі також виконано візуалізацію повітряного обтікання ніші за допомогою сажо-керосинової суміші, отримані результати підтверджують перебудову циркуляційної зони в ніші за наявності структуратора з переміщенням вихрової структури до задньої стінки, що супроводжується його видозміною відповідно до форми нішевої порожнини (рис. 4).

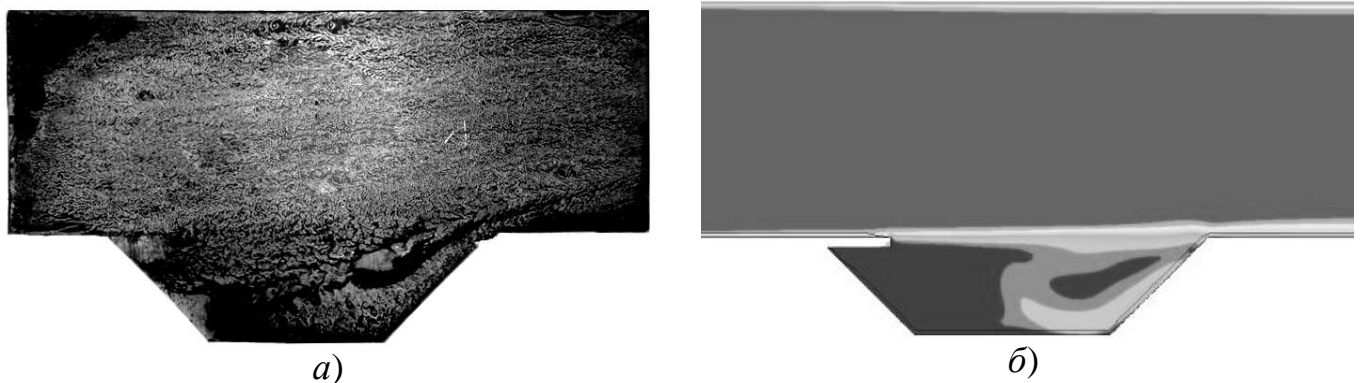


Рис. 4. Візуалізація обтікання нішевої порожнини повітряним потоком за допомогою сажо-керосинової суміші (а); методами математичного моделювання (б); $W_{\Pi} = 25$ м/с

Четвертий розділ присвячено дослідженню масообміну в СНС, а також впливу її геометричних параметрів на стабілізаційні властивості.

Масообмін потоку повітря з нішею досліджувався на пускових режимах роботи. За основу досліджень взято методику А. Лефевра, в якій кількість суміші, що потрапляє в зону циркуляції, визначають за рівністю концентраційних полів у зоні стабілізації факелу на межі «бідного» зриву полум'я під час кінетичного та дифузійного спалювання палива. Витрати газу в обох випадках фіксуються на момент зриву полум'я, таким чином, в умовах досліджуваної геометрії відношення витрат $G_{\Gamma_1}/G_{\Gamma_2}$ є величиною майже не залежною від режиму роботи установки. Для ніші 20/5 відношення витрат становить близько 1,1...1,5 % (при $H_k = 36$ мм), що водночас є показником величини масообміну ЗЗС з активним потоком повітря. Для умов СНС $L/H = 40/10$ мм, $H_k = 36$ мм, $\bar{G}_{\Pi}^{\text{pec}} = G_{\Pi}^{\text{pec}}/G_{\Pi}$ становить близько 3,5 % від загальної витрати повітря і визначається такими геометричними характеристиками системи: L/H та H_k . У разі незмінної відносної витрати повітря в ЗЗС абсолютна витрата збільшується пропорційно швидкості потоку окисника, що набігає.

Як узагальнюючу залежність щодо масообміну нішевої порожнини з активним потоком повітря запропоновано такий вираз:

$$M = \frac{G_{\Pi}^{\text{реп}}}{G_{\Pi}} = k \cdot \left(\frac{H}{H_k} \right)^{1,1}, \quad (2)$$

k – параметр, який визначають для прямокутних каверн залежно від їх об'єму.

Таблиця 1

Значення параметра k у розрахунковій залежності (2)

Типорозмір L/H	20/5	33/7	40/10	75/15	80/20
k	0,07	0,1	0,13	0,17	0,24

Аналітичне дослідження впливу масообмінних параметрів СНС на межу «бідного» зриву факела виконано за допомогою теорії теплової стабілізації факела. Якщо не брати до уваги втрати тепла, а також урахувати, що паливо, яке потрапляє в нішу, згоряє там повністю і течія в зоні рециркуляції є стаціонарною, то з рівняння теплового балансу випливає:

$$\alpha_{\text{ЗЗС}} = \frac{\alpha_{\Sigma} \cdot c_p \cdot (T_z - T_{\text{сум}})}{Q_n^p - L_0 \cdot \alpha_{\Sigma} \cdot M \cdot c_p \cdot (T_z - T_{\text{сум}})}, \quad (3)$$

де: $\alpha_{\text{ЗЗС}}$ – коефіцієнт надлишку повітря в зоні зворотних струмів на межі «бідного» зриву полум'я; Q_n^p – нижча теплота згоряння палива, Дж/м³; L_0 – стехіометричний коефіцієнт, м³/м³; C_p – теплоємність продуктів згоряння палива, Дж/(м³·К); T_z – температура запалювання суміші, К; $T_{\text{сум}}$ – температура горючої суміші, К.

Аналіз даних рис. 5 показує, що збільшення коефіцієнта масообміну зужує

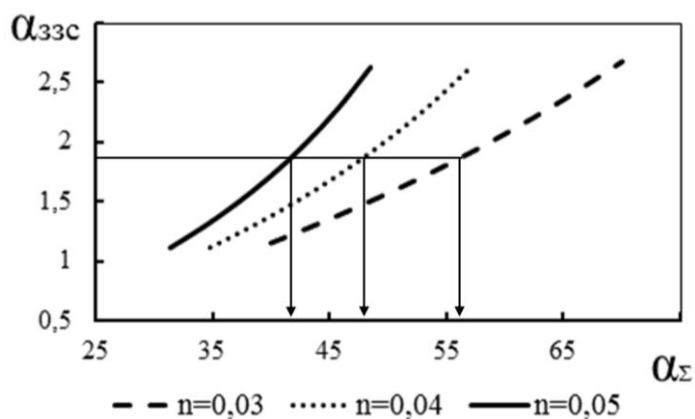


Рис. 5. Залежність коефіцієнту надлишку повітря ЗЗС від загального коефіцієнту надлишку повітря в системі для різних значень параметра масообміну, паливо – природний газ

межі сталого горіння в області «збіднених» сумішей. Таку особливість зумовлено збільшеною витратою палива в ЗЗС у разі збільшення об'єму нішевої порожнини зі збереженням висоти каналу, що необхідно для забезпечення мінімально необхідної пальної концентрації палива в об'ємі проходження хімічного реагування компонентів горіння. Проте фактично вказана особливість справедлива лише для каналу з $H_k \geq 40$ мм. У разі зменшення H_k стабілізаційні якості

невеликих ніш погіршуються, що зумовлено збільшенням впливу пограничного шару на гідродинаміку потоку суміші в обмежених повітропроводах. Значення параметра H_k змінюються в діапазоні, що відповідає висоті повітряного каналу в сертифікованих пальниках.

У разі спалювання заздалегідь підготовленої суміші рекомендується виконувати СНС з відношенням $H/H_k > 0,25$.

У результаті аналізу впливу параметрів СНС на зривні характеристики системи, визначено межі «бідного» зриву полум'я з врахуванням її геометричних характеристик і режимних параметрів, коефіцієнта масообміну, а також виду пального газу. Запропоновано залежність:

$$\alpha_{\Sigma}^{\text{Бідн.зр.}} = (3,5 + M)^{-0,75} \cdot \left[\frac{Q_n^p}{\left(\frac{1}{\alpha_{33C}} + L_o \cdot M \right) \cdot c_p \cdot (T_3 - T_{\text{сум}})} - \frac{(W_{\Pi})^{1,9}}{(100 - W_{\Pi})^{0,65}} \right] \quad (4)$$

Для оцінювання межі «багатого» зриву полум'я отримано такий вираз:

$$\alpha_a^{\text{Б.зр.}} = \frac{5,2 \cdot S \cdot k_s \cdot \sqrt{\rho_{\Gamma} / \rho_{\Pi}} \cdot (L / H)^{0,13}}{L_0 \cdot 3,2 \cdot d} - \frac{(W_{\Pi})^{0,7}}{(100 - W_{\Pi})^{1,1}}, \quad (5)$$

де: S – крок розміщення газових отворів, мм; k_s – параметр далекобійності струменів; ρ_{Γ} та ρ_{Π} – густина палива та повітря відповідно, кг/м^3 .

Запропоновані залежності узагальнюють експериментальні результати для горючих газів з теплотворною здатністю від 6 до 106 МДж/м^3 .

Експериментальне дослідження меж горіння факелу в СНС з поодиноким струменем показало, що зі збільшенням діаметра розширюється діапазон сталого горіння (площа під кривими), за рахунок збільшення фізичного розміру зони стабілізації полум'я, яка утворюється в «затіненій» частині струменя (рис. 6).

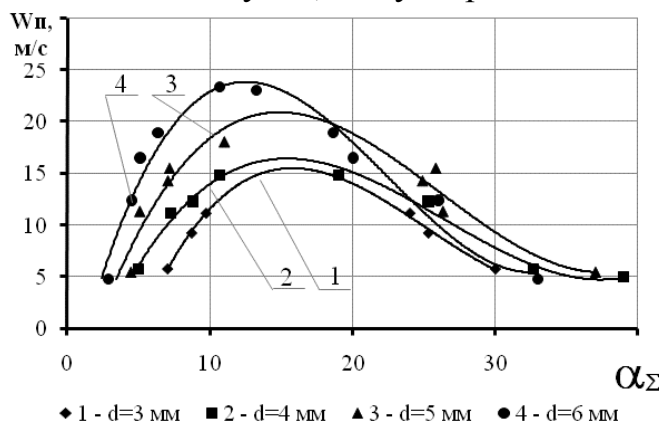


Рис. 6. Зривні характеристики поодинокого газового пропан-бутанового струменя в СНС при $L/H = 40/10$, $H_k = 72$ мм

Значення балансного коефіцієнта α у цьому випадку далекі від стехіометричних за рахунок транзитного потоку повітря в каналі, тому в досліджуваних умовах максимум значень зміщений із області стехіометрії в бік «збідненої» суміші і дещо зміщується зі зменшенням діаметра газового сопла.

З результатів видно, що поодинокий струмінь не дозволяє вивести систему на режими $\alpha \rightarrow 1,0$ і межа багатого зриву по коефіцієнту надлишку повітря знаходиться в діапазоні значень $\alpha = 3 \dots 5$ в умовах

пропанового факела. У результаті дослідження системи струменів встановлено, що зі збільшенням їх кількості розширюються межі стійкого горіння газу, особливо в області «збідненої» суміші (рис. 7).

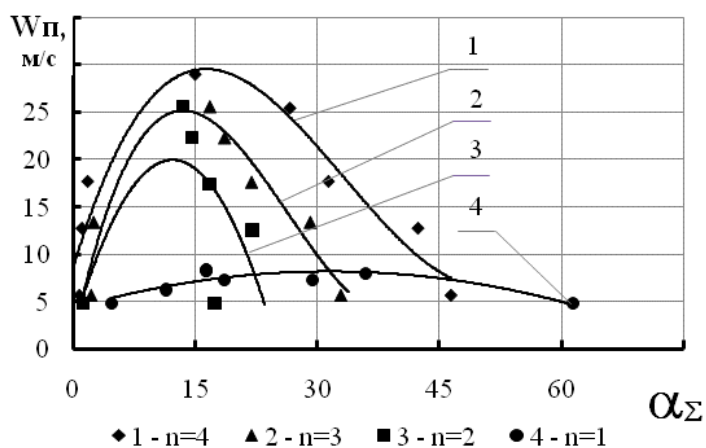


Рис. 7. Зрівні характеристики СНС при переході від поодинокого струменя ($n = 1$) до системи струменів з параметрами $L/H = 40/10$, $L_1 = 10$ мм, $H_k = 72$ мм, $d = 2$ мм, $S/d = 4,6$

У таблиці 2 показано вплив зміни конфігурації нішевого стабілізатора на величину місцевих гідравлічних втрат у зоні внутрішнього обтікання ніші паливом. Зміна кута нахилу бокових стінок з 90° до 45° зменшує втрати в середньому на 20 %, і, як показала промислова експлуатація пальників, забезпечується надійне охолодження теплонапружених стінок стабілізатора. Технологічно, зміна конфігурації спрощує виготовлення пальників за рахунок заміни зварних з'єднань штампуванням.

Таблиця 2

Зниження коефіцієнта місцевих гідравлічних втрат при внутрішньому обтіканні ніші паливом

$G_r / G_r^{ном}$		0,15	0,3	0,6	1,0
Re		$2 \cdot 10^3$	$5,3 \cdot 10^3$	$3,5 \cdot 10^4$	$5 \cdot 10^4$
ξ		3,25	3,01	2,88	2,86
ξ/ξ_0		0,95	0,94	0,93	0,93
		0,78	0,79	0,8	0,8

Визначення гідравлічного опору виконано на одиничному пілоні полум'я шириною 45 мм, $L/H = 20/5$, діаметри газоподавальних отворів становлять 4 мм, номінальна пропускна здатність – $0,021 \text{ м}^3/\text{с}$. Найменша висота внутрішнього щілинного каналу $\delta = 5$ мм.

З огляду на розміри повітряного каналу, гідравлічні втрати під час зовнішнього обтікання ніші є незначними, але, подібно до внутрішнього обтікання пілона паливом, також дещо зменшуються зі зменшенням кута нахилу бокових стінок ніші.

Гідравлічні втрати в каналі під час холодних продувок і горіння суттєво відрізняються за рахунок теплового розширення продуктів згорання у процесі проходження реакції. Значення ξ зростає з 0,04 (повітряне обтікання ніші) до 0,75 на пускових режимах роботи стабілізатора ($\alpha = 6 \dots 12$). У процесі виходу СНС на номінальні швидкісні режими потоків окисника та палива гідравлічний опір дещо зменшується (в умовах $\alpha_\Sigma = \text{const}$ зі збільшенням швидкісного режиму повітря в каналі), тоді як максимальні його значення досягають $\xi = 1,5$ на мінімальній швидкості повітря $W_p = 4 \text{ м/с}$ (рис. 8). Величину опору СНС потоку повітря під час горіння палива можна оцінити залежністю:

$$\xi = \frac{-0,001 \cdot Fr_{\Pi} + 1,2}{\alpha^{0,7}}, \quad (6)$$

де $Fr_{\Pi} = \frac{W_{\Pi}^2}{g \cdot H_{\kappa}}$ – число Фруда для потоку повітря.

При порівнянні граничних меж горіння палива в СНС визначено, що найкращі стабілізаційні якості має прямокутна ніша. Граничний кут нахилу бокових стінок становить близько 30° , при цьому полум'я стабілізується не в усьому діапазоні режимних досліджень, а тільки за швидкості потоку окисника більше 15 м/с (рис. 9). Визначено, що для ніші розміром $L/H = 20/5$ зміна кута з прямого на кут 45 градусів є менш істотною на межі стабілізації факелу порівняно з більшими за розміром нішами.

Дослідження впливу плоскої накладки-структуратора показало, що його використання в умовах «трапецієподібних» нішевих порожнин за стабілізаційними можливостями наближається до прямокутної ніші, тим самим забезпечуючи надійні пускові межі. Температура металу структуратора є помірною (не перевищує 320°C) і досягає таких значень на максимальних швидкостях окисника. Довжина структуратора обирається зі співвідношення $L_3 = (0,4 \dots 0,5) \cdot H$.

У роботі оцінено вплив геометричних параметрів СНС на появу пульсаційного горіння, яке виникає при виході системи на режими, близькі до максимальних витрат палива, у процесі чого спостерігається два види початкової ділянки факела – зони стабілізації. Перший режим – це локалізація полум'я в нішевій порожнині за мінімальних витрат палива, (рис. 10, а), а другий – це стабілізація полум'я на струменях за рахунок циркуляційної структури, яка виникає в результаті взаємодії струменів палива з потоком окиснювача при виході на номінальну потужність системи (рис. 10, б). Важливим

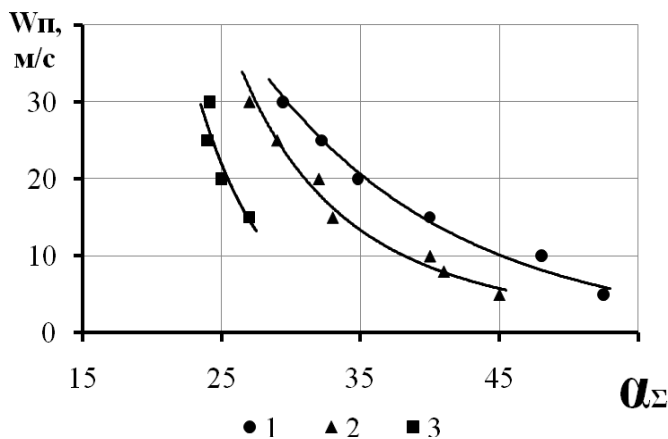


Рис. 9. Межі «бідного» зриву полум'я в СНС ($d = 2$ мм; $L/H = 40/10$; $H_{\kappa} = 72$ мм) при зміні кута нахилу бокових стінок: 1 – прямокутна ніша; 2 – трапецієподібна ніша зі стінками під кутом 45° ; 3 – 30° ; паливо – метан

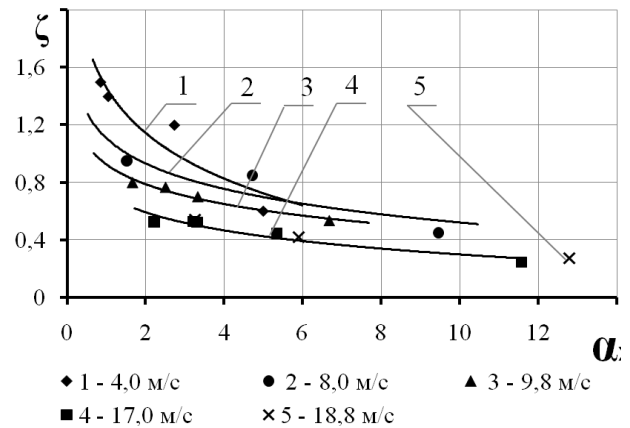


Рис. 8. Гідрравлічні втрати в повітряному каналі висотою $H_{\kappa} = 72$ мм з нішею $L/H = 40/10$ під час горіння палива

постає початок процесу стабілізації на струменях, оскільки він супроводжується переміщенням факела з нішевої порожнини до газових отворів і характеризується появою тимчасових пульсацій полум'я. Досягнувши певного значення швидкості

палива, полум'я стійко стабілізується за системою струменів і при цьому факел розповсюджується в області над нішею та в сліді за нею.



а)



б)

Рис. 10. Режими стабілізації полум'я в СНС

Визначено, що діаметри струменів палива за значень більше 3,0 мм дозволяють значно змістити зону стабілізації на струменях у бік «багатого» зриву полум'я. Прямокутні ніші мають найближчу до межі «багатого» зриву полум'я характеристику, а квадратні – більш наближену до межі підпалу. В закритих нішах ($L/H > 5,0$), режим стабілізації полум'я на струменях настає в межах значень $q = 4 \dots 6$, а відкриті каверни зміщують досліджувані межі як найдалі від розпалу факела і майже не залежать від швидкості потоку повітря.

Досліди показали, що зменшення висоти каналу H_k зі значень 72 мм до 36 мм зміщує зону пульсаційного горіння в сторону збагачення пальної суміші. Результати для каналу з $H_k = 72$ мм незалежно від швидкості потоку повітря для СНС знаходяться в межах стехіометричної суміші ($\alpha \approx 1$), а зменшення значень H_k у 2 рази зміщує характеристику межі

стабілізації на струменях до майже верхньої концентраційної межі горіння палива. Оцінювати появу досліджуваного явища в пальниках слід з урахуванням гідродинамічного параметра СНС $q = (\rho_f \cdot W_f^2) / (\rho_{\text{п}} \cdot W_{\text{п}}^2)$, а також значення загромождження повітряного каналу паливними пілонами полум'я $k_f = (z \cdot B_{\text{ст}}) / H_k$ (z – кількість пілонів у пальнику):

$$\alpha_{\text{CC}} = \frac{5,1}{\left(\frac{S}{d}\right)^{1,4}} \cdot q^{0,5} \cdot (1 - k_f)^{1,2}. \quad (7)$$

З ціллю визначення взаємного впливу параметрів паливорозподілу на межі сталого горіння факелу в СНС, у роботі виконано математичне планування експерименту та аналіз функції відгуку загального коефіцієнта надлишку повітря у стабілізаторі на режимах електроіскрового запалювання та режимах «бідного» зриву полум'я. Критерієм ефективності обрано значення загального коефіцієнта надлишку повітря на досліджуваних режимах $\alpha_z = f(d, L_1, \bar{S})$, який розглянуто в якості цільової функції.

Основними рівнями факторів під час побудови моделі взято такі значення геометричних параметрів: $d = X_1 = 3$ мм; $L_1 = X_2 = 17,5$ мм; $S/d = X_3 = 3,45$. За фактором X_1 прийнятий крок варіювання $\Delta X_1 = 1$ мм, по X_2 – $\Delta X_2 = 7,5$ мм, а по фактору X_3 – $\Delta X_3 = 1,15$.

Максимізація отриманих залежностей дозволяє визначити області рекомендованих значень параметрів паливорозподілу СНС для покращення пускових якостей пальників.

Розмір діаметра визначає масштаби подрібнення струменів палива і максимально можливу теплову потужність модуля, крок розміщення паливних отворів визначає концентрацію газу в зоні стабілізації факелу і, разом з тим, гідродинамічну структуру потоку суміші пального та окисника, а відстань L_1 дозволяє змінювати ступінь гомогенізації суміші. Результати визначення зривних та пускових меж при використанні природного газу у вигляді регресійних залежностей другого ступеню приведені нижче:

$$\alpha_{\Sigma}^{\text{пуск}} = 98,2 - 12,4d - 2,1L_1 - 17,1\bar{S} + 0,4L_1\bar{S} + 2,6d\bar{S}, \quad (8)$$

$$\alpha_{\Sigma}^{\text{зрив}} = 112,5 - 8,5d - 0,3L_1 - 30,8\bar{S} - 1,73d^2 - 0,04L_1^2 + 0,6S^2 + 0,4L_1\bar{S} + 4,7d\bar{S}. \quad (9)$$

Аналіз отриманих залежностей для природного та зрідженого газів показав прямий взаємозв'язок досліджуваних режимів пуску та зриву факела в системі, тобто покращення або погіршення пуску СНС однозначно призводить до аналогічної поведінки системи на межі «бідного» зриву факела.

Під час спалювання природного газу найбільше впливає зміна в межах діапазону варіювання відносного кроку \bar{S} за рахунок, по перше, зміни концентрації палива в зоні стабілізації, а по друге, за рахунок впливу відносного кроку на гідродинаміку циркуляційної течії в зоні стабілізації факела. Зміна \bar{S} з 2,3 до 4,6 значно звужує межі сталого горіння, але при цьому збільшення діаметру дещо компенсує цей ефект (рис. 11). Схожим чином поводить себе система у разі збільшення відстані паливних отворів від зривної кромки ніші L_1 .

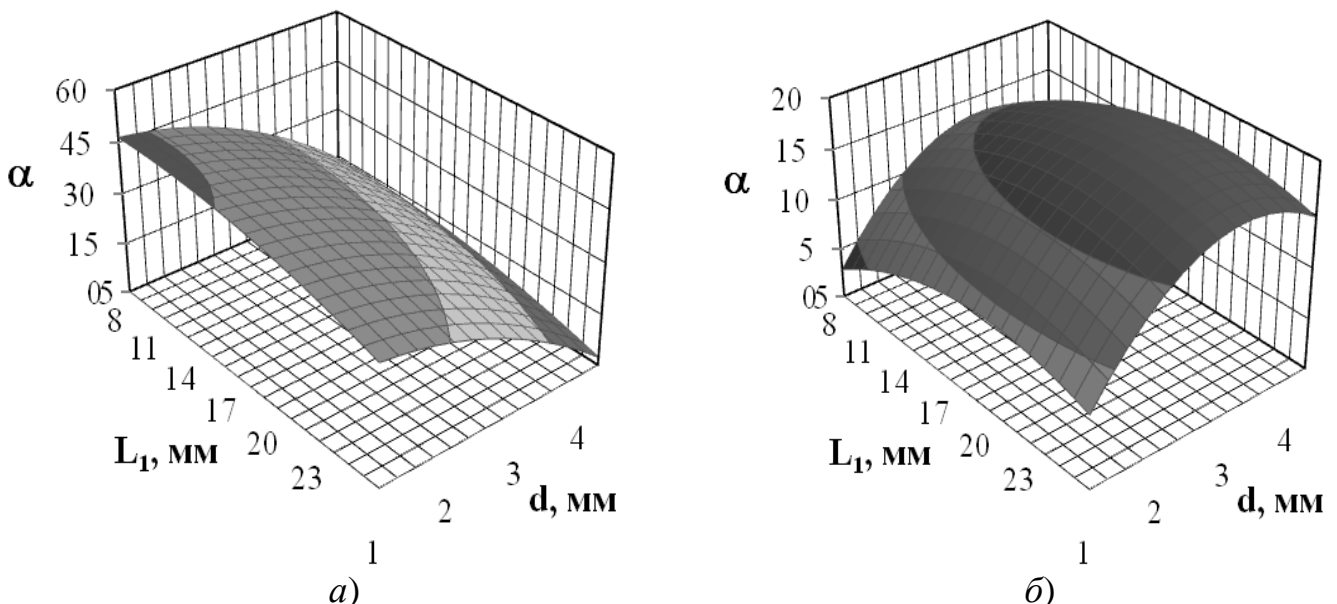


Рис. 11. Залежність загального коефіцієнта надлишку повітря від основних параметрів паливорозподілу на межі «бідного» зриву факела, $H_k = 72$ мм: а – $\bar{S} = 2,3$; б – $\bar{S} = 4,6$; паливо – природний газ

Установлено, що автотермічність процесів сумішоутворення до стехіометричних концентрацій палива в зоні стабілізації факела у разі спалювання

природного газу забезпечується за значень відносного кроку $3,2 \dots 3,8$, у разі використання зрідженого газу рекомендоване значення відносного кроку знаходиться в межах $4 \dots 4,5$, що не відповідає області максимальних значень на режимі пуску (табл. 3), тому вибирати параметри тільки з огляду на можливості покращення пускових характеристик недоцільно. Отже, проектуючи промислове газопальникове обладнання на основі СНТ, спершу обирають розмір діаметра залежно від технологічних особливостей ВО. Збільшення діаметрів зумовлює необхідність збільшити L_1 , оцінку якого в разі спалювання зрідженого газу слід зі співвідношення $L_1^{\text{зр.г.}} = 6,5 \cdot d - 2,5$, а для природного – $L_1^{\text{пр.г.}} = 2,9 \cdot d + 2,7$, мм. При $d < 2,5$ мм L_1 виконують, виходячи з конструктивних особливостей стабілізатора якнайближче до зривної кромки нішевої порожнини. Вибір кроку розміщення отворів для зрідженого газу оцінюється залежністю $S^{\text{зр.г.}} = 5,1 \cdot d - 2,2$, для природного – $S^{\text{пр.г.}} = 3,9 \cdot d - 1,2$.

Таблиця 3

Результати дослідження отриманих регресійних залежностей на наявність максимуму

Параметр паливорозподілу	Позначення	Діапазон значень параметрів, що відповідають $\alpha_{\text{зрив/пуск max}}$	
		природний газ	зріджений газ
Діаметр отворів	d , мм	1,3...2	4,5...5,0
Крок розміщення	\bar{S}	1,5...1,7	4,3...4,8
Відстань від ніші	L_1 , мм	5,0...7,0	5,0...7,0

При необхідності застосування двопаливного ПП з можливістю спалювання обох досліджуваних газів, система паливорозподілу виконується з відносним кроком $\bar{S} = 3,8 \dots 4,2$, у такий спосіб забезпечується надійна стабілізація факела з незначним збільшенням пускового тиску палива.

У п'ятому розділі досліджено вплив геометричних параметрів паливорозподілу на температурний стан факела та продуктів згорання. Визначено емісійні якості СНС у лабораторних умовах і в умовах промислового експерименту. Вибір геометричних параметрів СНС виконано з урахуванням рекомендацій, отриманих у попередньому розділі роботи.

Розподіл температур відповідає загальним уявленням щодо фізичних характеристик факела залежно від реалізованого механізму спалювання. Зі збільшенням гомогенізації пальної суміші процес горіння зміщується в бік кінетичного, що досягається за рахунок відповідного вибору параметрів паливорозподілу, при цьому рівні температур в ядрі факела збільшуються в середньому на $85 \dots 120$ °С, а довжина видимої його ділянки зменшується на $20 \dots 45$ %. Гомогенізація пальної суміші звужує діапазон регулювання горіння, особливо за рахунок звуження в зоні «збіднених» пальних сумішей (на $20 \dots 50$ %). Максимальне виміряне значення температур у ядрі факела не перевищувало 1345 °С.

Для визначення видимої довжини факела в СНС отримано залежність:

$$L_{\Phi}/d = c \cdot \left(\frac{\rho_{\Gamma} W_{\Gamma}^2}{\rho_{\Pi} W_{\Pi}^2} \right)^m \cdot \alpha^n, \quad (10)$$

де c, m, n – константа і показники степеня при змінних у рівнянні,

$$\text{природний газ: } \begin{cases} C=115; m=0,17; n=-1,13; \\ d=2\ldots6 \text{ мм}; W_{\Gamma}=6\ldots70 \text{ м/с}; \\ W_{\Pi}=3\ldots15 \text{ м/с}; \alpha=1,1\ldots3,0; \end{cases} \quad \text{зріджений газ: } \begin{cases} C=133; m=0,22; n=-1,26; \\ d=2\div6 \text{ мм}; W_{\Gamma}=3\ldots40 \text{ м/с}; \\ W_{\Pi}=3\ldots15 \text{ м/с}; \alpha=1,05\ldots3,0. \end{cases}$$

Аналіз емісійних показників СНС виконано за допомогою лінеаризації приведених до однозначних умов концентрацій оксидів азоту в продуктах згоряння палива за методикою проф. каф. ТЕУ Т і АЕС Г. М. Любчика. Приведення експериментальних даних виконано за відношенням:

$$\text{NO}_x^{\text{пр}} = \frac{\text{NO}_x}{\prod_{i=1}^5 K_i^{0,5}}, \quad (11)$$

де $\text{NO}_x^{\text{пр}}$ – сумарна концентрація оксидів азоту (NO та NO_2), приведених до діоксиду азоту; $\prod K_i$ – добуток коефіцієнтів впливу, $K_1 = K_{\psi}$ – коефіцієнт, що враховує вміст кисню в окиснику; $K_2 = K_p$ – коефіцієнт, який враховує тиск у зоні горіння; $K_3 = K_T$ – приведення за початковою температурою; $K_4 = K_{\alpha}$ – коефіцієнт надлишку повітря; $K_5 = K_{\tau}$ – коефіцієнт часу перебування суміші в зоні хімічного реагування.

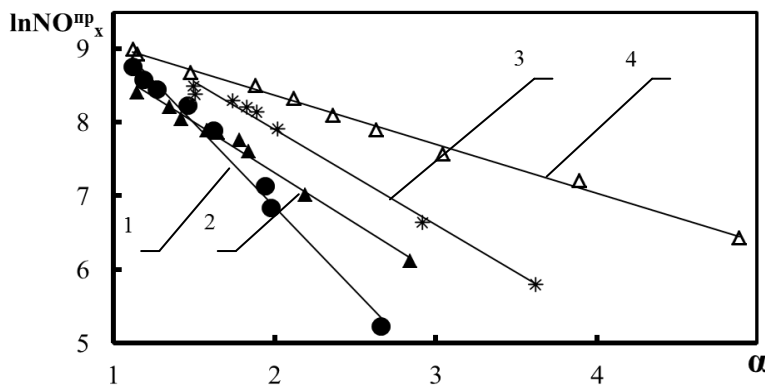


Рис. 12 Лінеаризовані емісійні характеристики СНС в залежності від коефіцієнту надлишку повітря; 1 – $d = 3$ мм, $\bar{S} = 3,0$; 2 – $d = 3$ мм, $\bar{S} = 3,0$; 3 – $d = 3$ мм, $\bar{S} = 5,0$; 4 – $d = 3$ мм, $\bar{S} = 4,5$; 1 – природний газ; 2, 3, 4 – зріджений газ

Модуль з відносним кроком $\bar{S} = 4,5$ має найбільші рівні концентрацій NO_x у всьому дослідженому діапазоні режимів роботи системи (рис. 12), але при цьому забезпечуються найкращі показники за сталістю горіння та глибиною вигорання палива. Зменшення кроку для пропан-бутану супроводжується зниженням рівня емісії NO_x за рахунок перезбагачення горючої суміші паливом і, водночас, збільшенням утворення продуктів неповного горіння вуглецю CO , що підтверджується

газовим аналізом: мінімум емісії чадного газу становить $0\ldots5$ ppm за відносного кроку $\bar{S} = 4,5$ і $5,0$, а зі зміною $\bar{S} = 3,0$ C_{CO} збільшується до 150 ppm. Продукти спалювання природного газу, в зоні $\alpha > 1,5$ мають найменші рівні концентрацій NO_x .

Промислові випробування запропонованих технічних рішень щодо покращення конструкції стабілізатора проводили на водогрійному котельному агрегаті КВГМ-20, обладнаного пальниками СНТ (рис. 13). У результаті модернізації досягнуто покращення техніко-економічних показників: ККД у робочому діапазоні роботи збільшено в середньому на 3 %, а за часткових навантажень – до 6 %, при цьому концентрація оксидів азоту і вуглецю знаходиться в межах нормативних значень. Окрім того, досягнуто основної цілі роботи – зниження технічного мінімуму робочого навантаження до 5 % від номінального, що дозволяє підвищити надійність експлуатації ВО та збільшити міжремонтний термін експлуатації за рахунок відсутності термічного «удару» під час пуску обладнання.

У розділі подано результати оцінювання впливу технологічних засобів зниження емісії оксидів азоту на ВО з пальниками СНТ. Дослідження впливу введення продуктів згоряння в топковий простір проводилось на водогрійному котлі КВ-Г-6,5. Звертає увагу незначна залежність емісійних показників концентрації окису азоту від теплового навантаження котлоагрегату на потужностях, близьких до номінальних (рис. 14). На максимальному навантаженні під час випробувань (87,5 % від номінального) викиди NO_x були на 18,5 % більшими, ніж на частковому (37 % від номінального навантаження). Введення 12 % продуктів спалювання в топковий простір котла майже у 2,5 рази знижує вміст окислу азоту в продуктах згоряння. На досліджуваному об'єкті досягнуто зниження емісії NO_x у межах 3,4...4,8 % на 1 % газів рециркуляції, ефект збільшується з набором потужності й дозволяє знизити сумарну концентрацію до 100 мг/м^3 . Значення CO не перевищують гранично допустимих норм ($C_{\text{CO}} < 20 \text{ мг/м}^3$).



Рис. 13. Пальники СНТ-45 на модернізованому котлі КВГМ-20 КП «Житомиртеплокомуненерго»

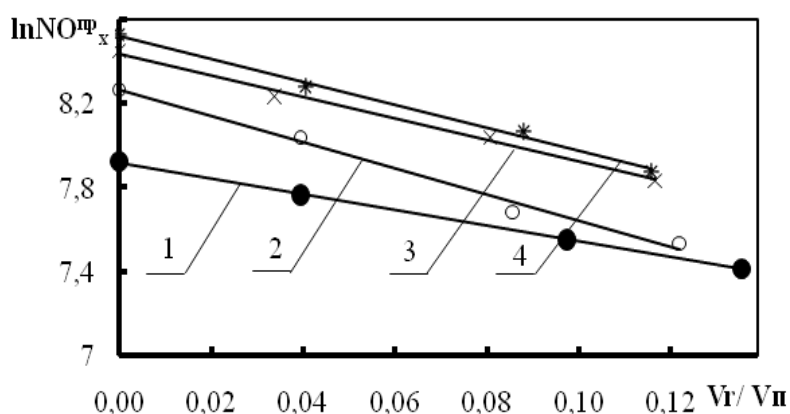


Рис. 14. Лінеаризовані емісійні характеристики водогрійного котельного агрегату КВ-Г-6,5 залежно від об'єму рециркуляції димових газів в зону горіння при зміні потужності: 1 – $N = 37\%$; 2 – $N = 55\%$; 3 – $N = 77\%$; 4 – $N = 87,5\%$

Для оцінювання рівня концентрації NO_x в продуктах згоряння пропонується залежність, мг/м^3 :

$$\text{NO}_x = A_{\text{NO}_x} \cdot e^{-(0,052 \cdot r)} \cdot \prod_{i=1}^n K_i^{0,5}, \quad (12)$$

де $A_{NO_x} = 4091$ – експериментальний коефіцієнт, $\text{мг}/(\text{м}^3 \cdot \text{с}^{0,5})$; r – ступінь рециркуляції газів, %.

Вплив зволоження дуттьового повітря на рівень емісії NO_x виконувався на контактних водонагрівачах і водогрійному котлі типу НІИСТУ-5, модернізованих на основі СНТ.

Зволоження здійснювалось зворотною водою з теплотережі, у такий спосіб, досягається не тільки його 100-відсоткове зволоження, але й підігрівання до температури $40 \dots 45^\circ\text{C}$. Приведені характеристики емісії оксидів азоту на рис. 15 підтверджують ефективність зволоження: в порівнянні з «сухим» спалюванням досягається більше ніж двократне зниження рівня емісії установками до значень $C_{NO_x} \approx 50 \text{ мг}/\text{м}^3$.

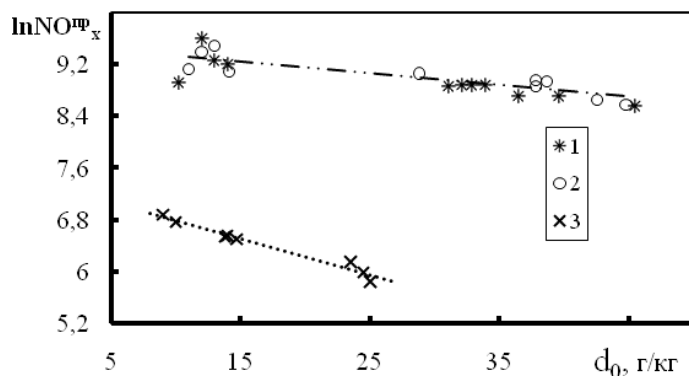


Рис. 15. Приведені емісійні характеристики NO_x для: 1, 2 – контактних водонагрівачів (2,9 МВт); 3 – водогрійного котла (0,5 МВт)

Використання в якості зволоження насиченої водяної пари виконано на котлі НІИСТУ-5, у результаті чого досягнуто також майже двократного зниження концентрацій оксидів азоту, при цьому максимальні концентрації містяться на рівні $80 \dots 90 \text{ мг}/\text{м}^3$ за вологовмісту $d_0 \approx 25 \text{ г}/\text{кг}$.

Для прогнозування рівня емісії ВО зі зволоженням дуттьового повітря слід використати таку залежність:

$$NO_x = A_{NO_x} \cdot \left(\frac{N}{N_0} \right)^a \cdot \left(\frac{d_{II}}{d_0} \right)^b \cdot \prod_{i=1}^n K_i^{0,5} \quad (13)$$

де A_{NO_x} – експериментальний коефіцієнт, $\text{мг}/(\text{м}^3 \cdot \text{с}^{0,5})$; N/N_0 – відношення поточної потужності установки до номінальної; d_0 – природний вологовміст дуттьового повітря без зволоження, $\text{г}/\text{кг}$; d_{II} – штучне зволоження, $\text{г}/\text{кг}$.

Таблиця 4
Результати статистичного аналізу емісійних характеристик паливних СНТ у складі ВО

Тип ВО	A_{NO_x} , $\text{мг} \cdot \text{с}/\text{м}^3$	a	b	d_0 , $\text{г}/\text{кг}$	d_{II} , $\text{г}/\text{кг}$
КВН-2,5	$9,55 \cdot 10^4$	-0,55	-0,25	1,0...10,0	10...55
НІИСТУ-5	$1,75 \cdot 10^3$	1,25	-0,6	1,0...3,0	10...22

Організація випарних установок у складі промислового ВО за рахунок теплоти відхідних газів для організації «вологого» горіння розцінюється перспективним способом зниження емісії оксидів азоту на обладнанні тепловою потужністю до 20 Гкал.

ВИСНОВКИ

У роботі запропоновано вирішення важливого науково-технічного завдання з вдосконалення технічних характеристик універсальної струменево-нішевої технології спалювання газоподібного палива за рахунок покращення пускових режимів (зниження пускового тиску палива) і зниження максимально можливого технічного мінімуму робочого навантаження промислових паливо використовуючих установок, які модернізовані на основі СНТ. Встановлено можливості стосовно зниження емісійних характеристик модернізованого обладнання за допомогою технологічних засобів впливу – рециркуляції продуктів згоряння в топковий об'єм ВО та зволоження дуттьового повітря.

Досягнення поставленої мети виконувалось на основі комплексного фізичного моделювання основних складових робочого процесу на струменево-нішевій системі з наступною перевіркою отриманих результатів під час тестування пальників у промислових умовах експлуатації. Емісійні параметри системи досліджувались на діючому енергетичному обладнанні.

За результатами виконаних досліджень можна сформулювати такі висновки:

1) Дослідження режиму «пуску» та «зриву» в СНС показало, що пускові витрати палива в 1,05...2,5 рази більші і визначаються геометричними та режимними параметрами системи. На швидкості повітря $W_{\text{п}} > 20$ м/с ця різниця мінімізується, а при $W_{\text{п}} < 10$ м/с – досягає максимальних значень. Для ніші з глибиною $H = 10,0$ мм співвідношення витрат в середньому на 30...35 % менше в порівнянні з нішами $H = 5,0$ мм. Визначено, що для природного газу $G_{\text{зап}}/G_{\text{згас}}$ на 5...15 % менше в порівнянні з цим показником для зрідженого газу. Таким чином, для забезпечення надійності й безпечності пуску обладнання рекомендовано проводити підпал горючої суміші у пальнику за мінімальної швидкості повітря, а розмір ніші обирати з діапазону досліджуваних значень так, щоб забезпечити інтеграцію до наявної системи охолодження пілону.

2) За рахунок удосконалення конфігурації СНС досягнуто зниження пускового тиску пальника до 1 мм вод. ст. зі зниженням мінімально можливого робочого навантаження до 5 % від номінального. Результати отримані за рахунок таких заходів:

- зміни прямокутної ніші на трапецієподібну для зниження місцевих гідравлічних втрат при внутрішньому обтіканні пілону, а також підвищення ефективності охолодження тепло напружених стінок нішевої порожнини;
- використання плоскої накладки на передній за потоком повітря стінці ніші як гідродинамічний структуратор течії;
- дослідження впливу геометричних параметрів паливорозподілу на межі сталого горіння в СНС.

Підтверджено, що пальники СНТ мають найменший гідравлічний опір порівняно з реєстровими, струменево-стабілізаторними і кутниковими, але зіставні за рівнем гідравлічних втрат із пілонними пальниками. Досягнуті показники з якості пуску та регулювання навантаження переважають основні сучасні аналоги промислового газопальникового обладнання.

3) Встановлено основні закономірності масообміну нішевої порожнини з потоком суміші, що набігає. Запропоновані залежності (4) та (5) для розрахунку межі «бідного» та «багатого» зриву факелу в СНС. Визначено, що для пальників з коефіцієнтом загромождження повітряного каналу $k_f \geq 0,45$ надійна стабілізація полум'я забезпечується нішею з глибиною 7...10 мм і покращується при збільшенні її розмірів. У випадку $k_f = 0,25...0,44$ ніша може не перевищувати глибини 5,0 мм. Рекомендовані типорозміри ніш $L/H = 4,0...5,0$.

4) У результаті комплексного аналізу впливу параметрів паливорозподілу на пускові режими, а також на діапазон регулювання роботи СНС, надано рекомендації стосовно їх вибору відповідно до виду пального газу. Визначено, що адаптація пальника у разі використання як резервного палива зрідженого газу відбувається за рахунок вибору відносного кроку розміщення отворів у межах $\bar{S} = 3,8...4,2$, це призводить до збільшення пускових витрат палива до 20 %, але зберігаються робочі характеристики на номінальному навантаженні агрегату.

5) За результатами промислового експерименту доведено ефективність технологічних засобів зниження емісії оксидів азоту ВО, модернізованого на основі СНТ. При введенні 12 % рециркуляції димових газів у топковий простір водогрійного котла досягається зниження рівня викидів у середньому на 45...60 % залежно від навантаження агрегату. Зі зволоженням дуттьового повітря у складі контактних водонагрівачів концентрація окислів азоту зменшилася більше ніж у 2 рази і становила $C_{NOx} = 80...100 \text{ мг/м}^3$ при збереженні емісії оксиду вуглецю в нормативних межах – $C_{CO} = 30...55 \text{ мг/м}^3$. Схожих показників зі зниження окислів азоту досягнуто під час зволоження повітря насиченою парою на водогрійному котлі.

6) Доведено можливість реалізації принципів універсалізації при конструюванні пальників необхідної теплової потужності за рахунок набору необхідної кількості базових (одиначних) пілонів полум'я, а також можливості методу фізичного моделювання робочого процесу на одиначних паливорозповсюджуючих модулях із наступним адекватним застосуванням отриманих залежностей до системи модулів, зібраної у прямокутному повітряному каналі в рівномірну решітку плоских струменево-нішевих стабілізаторів-пілонів.

7) Підтверджено можливість реалізації принципів маловитратності завдяки впровадженню ПП СНТ, що досягається за рахунок низького рівня металомісткості пристроїв (у 2,5...5 разів менше порівняно зі штатними пальниками), використання простої технології виготовлення пілонів, простотою обслуговування та експлуатації, високою енергетичною ефективністю, яка досягається за рахунок організації раціонального розподілу палива в потоці окисника, наявності стійкої вихрової структури незалежно від теплового режиму роботи обладнання, зниженням гідравлічним втратам. Вищевказане дозволяє заощаджувати енергоресурси за рахунок зниження витрат на привід тягодуттьових засобів (до 40 %) і зменшення витрати палива під час роботи на знижених навантаженнях.

8) Комплекс отриманих результатів використано підприємством ТОВ «НПК «СНТ» при розробці технічної документації на пальники струменево-нішевого типу широкої номенклатури типорозмірів від 0,3 до 20 МВт.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Абдулін М. З. Вітчизняні енергоефективні технології – запорука енергетичної безпеки держави [Текст] / О. А. Сірий, М. З. Абдулін: монографія. – «КП», 2013. – С. 224–233.

Автор опрацював та узагальнив експериментальні дані промислового впровадження пальників на основі СНТ.

2. Абдулін М. З. Ізотермічні дослідження модулів пальникових пристроїв на основі струменево-нішевих систем [Текст] / М. З. Абдулін, О. А. Сірий // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». – Харків: НТУ «ХПІ», 2013. – № 13. – С. 81–89.

Автор виконав комплекс числових досліджень процесів сумішоутворення для одно- та дворядкових систем паливоподачі в умовах ізотермічного протікання палива та окисника.

3. Абдулін М. З. Особливості процесів паливороздачі в струменево-нішевих системах [Текст] / М. З. Абдулін, О. А. Сірий // Східно-Європейський журнал передових технологій. – 2013. – № 64. – С. 22–25. (РИНЦ, EBSCO, Index Copernicus.)

Автор оцінив вплив схеми паливоподачі на гідродинамічні та масообмінні процеси в СНС залежно від основних геометричних параметрів паливорозподілу.

4. Abdulin M. Z. Research of hydrodynamic flame stabilizer with cross fuel feed characteristics [Текст] / M. Z. Abdulin, O. A. Siryy // Scientific Journal of Riga Technical University. Series: Power and Electrical Engineering. – 2014. – №32. – p.12–18. (Іноземне видання, внесено до EBSCO, ProQuest, De Gruyter, VINITI.)

У публікації автор виконав розрахунки параметрів робочого процесу СНС, а також оцінку меж сталого горіння палива в СНС залежно від геометричних параметрів паливорозподілу.

5. Абдулін М. З. Принципи організації робочого процесу камер згоряння [Текст] / М. З. Абдулін, О. А. Сірий // Авіаційно-космічна техніка та технологія. – 2014. – № 8(115). – С. 73–78. (VINITI, Index Copernicus, Google Scholar.)

Автор виконав огляд сучасних технологій спалювання органічних палив.

6. Абдулін М. З. Дослідження сталості горіння в струменево-нішевій системі при обмеженні далекобійності паливних струменів [Текст] / М. З. Абдулін, О. А. Сірий // Енергетика: економіка, технології, екологія. – 2014. – № 3(37). – С. 22–29. (РИНЦ, Google Scholar.)

Автор виконав аналіз та узагальнення експериментальних даних зривних характеристик СНС при використанні обмежувача далекобійності.

7. Сірий О. А. Дослідження гідродинаміки потоку повітря в струменево-нішевій системі спалювання палива [Текст] / О. А. Сірий, М. З. Абдулін, О. В. Баранюк // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». – Харків: НТУ «ХПІ», 2016. – №9. – С. 94–100. (Ulrich's Periodicals Directory, VINITI.)

Проектування та виготовлення дослідних зразків струменево-нішевого стабілізатора, а також оброблення і аналіз експериментальних результатів виконано безпосередньо автором.

8. Сірий О. А. Дослідження робочого процесу струменево-нішевої системи при одно- та дворядовій схемі розподілу палива [Текст] / М. З. Абдулін, О. А. Сірий // Сучасні проблеми наукового забезпечення енергетики. – Київ: НТУУ «КПІ», 2013. – С. 45.

Автор подав результати власного числового дослідження процесів сумішоутворення в СНС при одно- та дворядковій схемі подачі палива.

9. Абдулин М. З. Оптимизация гидротермических процессов – основа высокоэффективного сжигания топлива [Текст] / М. З. Абдулин, Г. Р. Дворцин, А. М. Жученко, А. А. Серый // Украина – Россия – Сколково. Единое инновационное пространство. Материалы междунар. конф. – Киев, 2013 – С. 121 – 122.

Автор опрацював дані промислового випробування пальників.

10. Абдулін М. З. Энергоефективні технології на вогнетехнічних об'єктах України та аспекти їх впровадження [Текст] / М. З. Абдулін, О. А. Сірий // Проблемы экологии и эксплуатации объектов энергетики: материалы XXIII Международной конференции. – Ялта, 2013. – С. 43.

Здобувач опрацював дані промислового випробування пальників.

11. Абдулин М. З. Развитие струйно-нишевой технологии в теплоэнергетике [Текст] / М. З. Абдулин, М. В. Гребинная, А. А. Серый // Повышение эффективности энергетического оборудования: материалы VIII ежегодной международной науч.-практ. конф. – Москва, 2013. – Т. 2 – С. 22–33.

Автор опрацював та подав дані щодо характеристик процесів сумішоутворення в СНС при зміні геометричних характеристик рядної подачі палива.

12. Сірий О. А. Дослідження гідродинамічного стабілізатора полум'я з поперечною подачею палива [Текст] / О. А. Сірий, М. З. Абдулин // Сучасні проблеми наукового забезпечення енергетики. – Київ: НТУУ «КПІ», 2014. – С. 101.

Автор розрахував та оцінив стабілізаційні якості СНС залежно від її геометричних та режимних параметрів.

13. Абдулін М. З. Вітчизняні енергоефективні технології – запорука енергетичної безпеки держави [Текст] / М. З. Абдулін, О. А. Сірий, І. О. Назарова // Актуальні задачі сучасних технологій: матеріали III Міжнар. наук.-техн. конф. молодих учених та студентів, Тернопіль, 19–20 листоп. 2014. – С. 231–232.

Автор проаналізував результати теплотехнічного налагодження водогрійних котлів тепловою потужністю 0,5...30 Гкал.

14. Абдулін М. З. Современное состояние технологий сжигания [Текст] / М. З. Абдулін, М. В. Гребінна, О. А. Сірий // матеріали XIII Всеукраїнської науково-практичної конференції студентів, аспірантів та молодих учених, Київ, 21–23 трав. 2015. – С. 103–106.

Автор виконав експериментальні дослідження зривних характеристик СНС при спалюванні зрідженого газу.

15. Абдулин М. З. Перспективы применения струйно-нишевой технологии при газификации твердого топлива [Текст] / М. З. Абдулин, А. А. Серый // Угольная теплоэнергетика: проблемы реабилитации и развития: сб. науч. тр. – тезисы докладов 11-й Междунар. науч.-практ. конф., Киев, 16–20 сентября 2015. – С. 86–91.

Експериментальні дослідження схем паливорозподілу в СНС виконано за участю автора.

16. Сірий О. А. Уточнение методики расчета горелочных устройств на примере струйно-нишевых систем [Текст] / О. А. Сірий // Інноваційний потенціал науки – XXI сторіччя. Запоріжжя: Південноукраїнський гуманітарний альянс, 2013. – С. 74.

Автором подав методику розрахунку параметрів паливорозподілу для багаторядового струменевого подавання палива.

АНОТАЦІЯ

Сірий О. А. Вплив параметрів струменево-нішевої системи на робочий процес пальникових пристроїв. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.14.14 – теплові та ядерні енергоустановки. – Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут» МОН України, Київ, 2016.

Дисертацію присвячено вирішенню проблем підвищення надійності й ефективності експлуатації паливовикористовуючого устаткування об'єктів промисловості та енергетики при проведенні їх маловитратної енергоекологічної модернізації за рахунок впровадження ефективної технології спалювання палива. Основну увагу приділено поліпшенню пускових характеристик пальникових пристроїв струменево-нішевого типу (ПП СНТ) для розширення діапазону робочого регулювання вогнетехнічного обладнання (ВО), модернізованого на основі технології, та подано результати щодо можливості зниження емісії шкідливих речовин.

У роботі в лабораторних умовах отримано: закономірності впливу геометричних та режимних параметрів струменево-нішевої системи (СНС) на межі пуску і зриву полум'я в системі, закономірності процесів масообміну активного потоку повітря в каналі з циркуляційною течією в нішевій порожнині за пускових режимів роботи системи, закономірності виникнення пульсаційного горіння в системі, оцінка гідравлічних втрат у каналі пальника, проведена адаптація геометричних характеристик подачі палива для спалювання природного і скрапленого газів, також встановлено вплив геометрії подачі палива на температурні параметри факела і його емісійні якості у вигляді залежностей оксидів азоту і вуглецю. У промислових умовах на діючому ВО оцінено технологічні засоби зниження емісії окислів азоту і розроблено рекомендації щодо їх впровадження на об'єктах комунальної енергетики.

Отримані рекомендації дозволили вдосконалити промислові ПП з наступним підтвердженням ефективності під час проведення еколого-теплотехнічних випробувань на діючих об'єктах тепломереж міст у складі водогрійних котлів, а також контактних водонагрівачів. Досягнуто економічного ефекту, який дозволив окупити витрати на модернізацію обладнання протягом одного опалювального сезону.

Ключові слова: струменево-нішева система, вогнетехнічний об'єкт, пальниковий пристрій, масообмін, пускові режими, «бідний» і «багатий» зрив полум'я, гідравлічні втрати, стабілізація полум'я на струменях, емісійні характеристики, струменево-нішева технологія.

АННОТАЦІЯ

Серый А. А. Влияние характеристик струйно-нишевой системы на рабочий процесс горелочных устройств. – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.14.14 – тепловые и ядерные энергетические установки. – Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт» МОН Украины, Киев, 2016.

Диссертация посвящена решению проблем повышения надежности и эффективности эксплуатации топливопотребляющего оборудования объектов промышленности и энергетики при проведении их малозатратной энергоэкологической модернизации за счет внедрения эффективной струйно-нишевой технологии (СНТ) сжигания топлива. Основное внимание в работе уделено улучшению пусковых характеристик горелочных устройств (ГУ) СНТ с целью расширения диапазона рабочего регулирования модернизируемого огнетехнического оборудования (ОО), представлены результаты относительно возможности снижения эмиссии вредных веществ.

В работе установлено влияние геометрических параметров топливоподачи и режимных характеристик струйно-нишевой системы (СНС) на границы пуска и срыва пламени. Получены основные закономерности массообменных процессов активного потока горючей смеси и циркуляционной структуры в объеме ниши на пусковых режимах работы системы, что позволило установить влияние объема нишевой полости на границы устойчивой работы системы при изменении высоты воздушного канала. Получены эффекты влияния конфигурации нишевой полости на процесс стабилизации факела. Представленные результаты позволили расширить коэффициент рабочего регулирования промышленных ГУ до 20.

Адаптация ГУ, работающих на природном газе, для использования сжиженного газа в качестве резервного топлива ОО, эффективно достигается за счет выбора рациональных параметров топливоподачи, при этом остальной конструктив универсален применительно к обоим горючим газам.

Показано, что пульсационное горение в системе возникает на режимах близких, к границе «богатого» срыва пламени, и зависит от геометрических параметров СНС. Представлены зависимости, которые позволяют оценить границы пульсационного горения в ГУ.

Рекомендации по усовершенствованию конструкции СНС применены на ГУ, установленных на водогрейном оборудовании теплосети г. Житомира. В результате этого, в течении отопительного сезона 2013-2014 гг., достигнуто снижение расхода топлива до 6 %.

В промышленных условиях на действующем ОО проведена оценка технологических средств снижения эмиссии окислов азота, где основное внимание

уделено определению влияния рециркуляции продуктов сгорания в топочное пространство и организации увлажнения окислителя. Разработаны рекомендации относительно возможности их внедрения на объектах коммунальной энергетики.

В работе предложена методика расчета двухтопливного ГУ, которая позволяет проектировать промышленные ГУ единичной мощностью до 20 МВт, работающие на природном и сжиженном газе, обладающие улучшенными пусковыми характеристиками и расширенным коэффициентом рабочего регулирования мощности ОО. Предложены зависимости для оценки концентраций оксидов азота в продуктах сгорания топлива модернизируемого оборудования.

Полученные рекомендации позволили усовершенствовать промышленные ГУ с последующим подтверждением эффективности при проведении эколого-теплотехнических испытаний на действующих объектах теплосетей городов в составе водогрейных котлов и контактных водонагревателей. Получен экономический эффект, что позволило окупить затраты на модернизацию оборудования в течении одного отопительного сезона.

Ключевые слова: струйно-нишевая система, огнетехнический объект, горелочное устройство, массообмен, пусковые режимы, «бедный» и «богатый» срыв пламени, гидравлические потери, стабилизация пламени на струях, эмиссионные характеристики, топливоиспользующее оборудование, струйно-нишевая технология.

ANNOTATION

Siriyi O.A. Influence of the characteristics of the jet-niche system workflow burners. – As the manuscript.

Thesis for Ph.D. degree of technical sciences by specialty 05.14.14 – Thermal and nuclear power installations. – National technical university of Ukraine “Kyiv polytechnic institute” MSE of Ukraine, Kyiv, 2016.

The thesis is devoted to the reliability and efficiency of operating industrial and energy fuel consumption equipment during their low-cost energy ecological modernization by introducing effective technologies of fuel combustion problems solving. Main attention is paid to improvement of jet-niche type burner devices starting characteristics to extend the range of working regulation fuel consumption equipment modernized on technological base and presented the results of harmful substances emission reduction.

The work submitted lab received results: regularities of geometrical and operational parameters of jet-niche system on the verge of starting and "disrupt" of flame in the system, mass transfer processes regularities of active air flow channel with circulating currents in the niche cavity modes at system launch, occurrence patterns of pulsating system combustion, evaluation of hydraulic losses in the burner channel, helded adaption of the fuel supply geometric characteristics for combustion of natural and liquefied gas, also established the influence of fuel supply geometry on thermal parameters of the torch and its emission quality as a dependency of nitrogen oxides and carbon, in industrial environments on the existing fire technical object evaluated technological means of nitrogen oxides emissions reducing and recommendations for their implementation at communal power facilities.

The resulting recommendations allowed to improve industrial BD with further proof of effectiveness in conducting environmental and thermal tests on existing cities heating systems facilities as part of boilers and water heaters contact. Reached an economic benefit, which allowed to recoup equipment modernization cost in a term of one heating season.

Keywords: jet-niche system, fire-technical object, burner devices, mass transfer, starting modes, poor and rich flame failure, hydraulic losses, flame jets stabilization, emission characteristics, spray-niche technology.